

А. В. ГРИНЕНКОВ, А. И. МАШОШИН

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО ИСТОЧНИКА ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ БЕЗ СПЕЦИАЛЬНОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЯ

*В статье обоснован не требующий специального маневрирования наблюдателя автоматический алгоритм определения координат и параметров движения подводного источника шумоизлучения, обнаруженного в режиме шумопеленгования гидроакустическим комплексом подводной лодки. Приведены описание алгоритма и результаты его моделирования для типовых ситуаций.*

**Ключевые слова:** гидроакустика, шумящий объект, определение координат и параметров движения объекта, моделирование.

### Введение

Координаты и параметры движения (пеленг  $P$ , дистанция  $R$ , курс  $K$ , скорость  $V$ ) (КПД) морского объекта, обнаруженного гидроакустическим комплексом (ГАК) подводной лодки (ПЛ) в режиме шумопеленгования, являются основой для расхождения с объектом на безопасном расстоянии [1, 2].

Все известные алгоритмы определения КПД по данным режима шумопеленгования опираются на изменение пеленга объекта во времени. Проблема состоит в том, что при прямолинейном и равномерном движении источника шумоизлучения и наблюдателя (а именно так в абсолютном большинстве ситуаций движутся морские объекты) вычисление КПД с использованием только пеленгов принципиально не приводит к однозначному результату [1–5]. Выходом из положения является либо специальное маневрирование ПЛ-наблюдателя, либо привлечение дополнительной информации о курсе, скорости или дистанции до объекта наблюдения.

В результате все известные отечественные и зарубежные алгоритмы определения КПД можно условно разбить на 2 группы [2]:

- автоматические алгоритмы ( $n$  пеленгов), предполагающие использование только динамики пеленгов объекта наблюдения, для чего требуется специальное маневрирование ПЛ-наблюдателя;
- автоматизированные алгоритмы (подбор), базирующиеся не только на динамике пеленгов, но и привлекающие дополнительную информацию (как правило, скорости объекта наблюдения), оцениваемую оператором-гидроакустиком при прослушивании шума объекта с учетом его класса.

---

**Гриненков** Алексей Владимирович. Начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

**Машошин** Андрей Иванович. Доктор технических наук, начальник научно-исследовательского центра «Интегрированные системы освещения обстановки», АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

И те и другие алгоритмы имеют недостатки. Для алгоритмов 1-й группы это недопустимо длительное время решения задачи, к тому же они не могут быть задействованы в условиях интенсивного судоходства ввиду необходимости постоянного маневрирования ПЛ-наблюдателя. Недостаток алгоритмов 2-й группы – низкая точность выработки КПД.

Создание и практическая реализация алгоритма определения КПД без перечисленных недостатков остается актуальной задачей [6].

В работе описывается автоматический алгоритм определения КПД по данным режима шумопеленгования ГАК ПЛ, не требующий специального маневрирования носителя ГАК. Суть предлагаемого подхода изложена авторами в работах [7–9].

## 1. Обоснование алгоритма

Данный подход состоит в автоматической выработке известными методами оценок скорости, дистанции и курса объекта наблюдения и использовании этих данных при определении КПД по динамике его пеленгов.

При разработке алгоритма учитывались следующие факторы.

1. Для оценки скорости объекта наблюдения и дистанции до него с приемлемой точностью необходимо знать его класс. В итоге, когда класс объекта будет установлен, из всех результатов определения КПД, полученных на текущий момент времени для разных гипотез, выбирается соответствующий этому классу. Вместе с тем процедуру расчета КПД для разных гипотез следует продолжать и дальше, так как не исключена вероятность того, что решение о классе объекта в процессе его наблюдения будет пересмотрено.
2. Предполагается, что траектория объекта состоит из галсов, на каждом из которых он движется прямолинейно и равномерно. В момент изменения курса и/или скорости объекта завершается текущий галс и начинается новый. Алгоритм должен уметь выявлять момент смены галсов и на новом галсе начинать определение КПД заново с учетом результатов, полученных на предыдущем галсе.
3. Работа алгоритма не должна зависеть от маневрирования наблюдателя: необходимо, чтобы КПД вырабатывались как при его движении с постоянным вектором скорости (в том числе с нулевым), так и при маневрировании по курсу и/или скорости.
4. В основу синтеза алгоритма целесообразно положить критерий максимального правдоподобия, хорошо зарекомендовавший себя при решении аналогичных задач [10–12].
5. Алгоритм должен функционировать циклически с периодом измерения пеленгов объекта наблюдения. При этом не допускается ограничений на периодичность и синхронность поступления входных данных: если пеленг объекта следует измерять периодически, то скорость объекта и дистанцию до него можно определять существенно реже, в частном случае однократно.

Синтез алгоритма по критерию максимального правдоподобия базируется на стохастической модели движения объекта на прямолинейном галсе вида

$$\hat{P}_i = P(t_i, K, V, R_j) + \Delta P_i, \quad (1)$$

где  $\hat{P}_i$  – оценка пеленга объекта в момент времени  $t_i$ ;

$P(t_i, K, V, R_j)$  – неслучайная функция, связывающая фактическое значение пеленга

объекта в момент времени  $t_i$  с его курсом  $K$ , скоростью  $V$  и дистанцией  $R_j$  в произвольный момент времени  $t_j$ ;

$\Delta P_i$  – случайная погрешность оценки пеленга  $\hat{P}_i$ , распределенная по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_p$ , вычисляемым по формуле [13]

$$\sigma_p = 0,8 \cdot \frac{\Delta q}{Q_{ind} \cdot \cos q}, \quad (2)$$

где  $q$  – угол между направлением на объект и нормалью к антенне, град;

$\Delta q$  – ширина характеристики направленности по нормали к антенне, град;

$Q_{ind}$  – индикаторное отношение сигнал/помеха.

Функция  $P(t_i, K, V, R_j)$  связана с параметрами движения объекта наблюдения и ПЛ-наблюдателя формулой [2]

$$P(t_i, K, V, R_j) = \arctg \frac{X_n(t_j) + R_j \cdot \sin(P_j) + V \cdot (t_i - t_j) \cdot \sin(K) - X_n(t_i)}{Y_n(t_j) + R_j \cdot \cos(P_j) + V \cdot (t_i - t_j) \cdot \cos(K) - Y_n(t_i)}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

где  $X_n(t_i)$ ,  $Y_n(t_i)$  – декартовы координаты ПЛ-наблюдателя, соответствующие моменту времени  $t_j$ ;

$N$  – количество моментов времени с начала текущего галса, в которые измерялись пеленги объекта;

$R_j$ ,  $P_j$  – дистанция и пеленг объекта, соответствующие некоторому произвольному моменту времени  $t_j$  из массива  $i = 1, \dots, N$ .

Если зафиксировать в правой части формулы (1) значения курса, скорости и дистанции объекта, то единственной случайной величиной останется только погрешность измерения пеленга  $\Delta P_i$ . В результате условная плотность распределения вероятностей (ПРВ) оценки пеленга в момент времени  $t_i$  запишется в виде [14]

$$g_{\hat{P}_i/K, V, R_j}(p_i) = g_{\Delta P_i}(p_i - P(t_i, K, V, R_j)), \quad (4)$$

где  $g_{\Delta P_i}(p)$  – ПРВ погрешности измерения пеленга на  $i$ -м цикле решения задачи, предположительно являющаяся нормальной ПРВ с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{p_i}$ , вычисляемым по формуле (2).

Поскольку пеленги измеряются на разных временных интервалах, погрешности их измерения независимы. Тогда совместная условная (в зависимости от курса, скорости и дистанции объекта) ПРВ оценок всех пеленгов будет равна произведению условных ПРВ оценок отдельных пеленгов:

$$g_{\hat{P}_1, \dots, \hat{P}_N/K, V, R_j}(p_1, \dots, p_N) = \prod_{i=1}^N g_{\Delta P_i}(p_i - P(t_i, K, V, R_j)). \quad (5)$$

Одним из алгоритмов определения КПД обнаруженного объекта с использованием только массива пеленгов является подстановка в правую часть (5) вместо случайных аргументов  $p_i$  оценок пеленгов  $\hat{P}_i$  (это превращает (5) в функцию правдоподобия, зависящую только от курса, скорости и дистанции объекта) и нахождение значений курса, скорости и дистанции объекта, соответствующих ее глобальному максимуму. Тем не менее, как было замечено выше, использование только массива пеленгов не обеспечивает однозначного решения задачи при равномерном и пря-

молинейном движении объекта наблюдения и наблюдателя. Необходимо привлечь дополнительную информацию в виде оценок курса, скорости и дистанции, полученных на основе обработки других данных, и формирования совместной ПРВ оценок пеленгов, курса, скорости и дистанции объекта. Максимально правдоподобными оценками будут КПД, соответствующие глобальному максимуму такой ПРВ.

Начнем с определения скорости обнаруженного объекта. Поскольку она зависит от его класса, то целесообразно поступить следующим образом. С помощью справочников и статистических данных рассчитать среднее значение  $m_{V/\omega}$  и среднеквадратический разброс  $\sigma_{V/\omega}$  скорости объектов каждого класса  $\omega$  для района плавания, в котором они могут быть обнаружены. Например, во внутренних морях наиболее часто встречаются неатомные ПЛ, торговые суда среднего и малого водоизмещения, боевые надводные корабли классов «корвет» и «фрегат», а в открытых океанских районах – атомные ПЛ, крупные торговые суда и лайнеры, большие боевые надводные корабли.

При таком подходе ПРВ скорости обнаруженного объекта можно записать в виде

$$g_{V/\omega}(v) = \text{norm}(v \| mV_{\omega}; sV_{\omega}), \quad (6)$$

где  $\text{norm}(v \| mV_{\omega}; sV_{\omega})$  – нормальная ПРВ случайной величины  $V$  с математическим ожиданием  $mV_{\omega}$  и среднеквадратическим отклонением  $sV_{\omega}$  ( $v$  – неслучайный аргумент ПРВ).

Заметим, что скорость объекта можно уточнить, если выделен вально-лопастной звукояд дискретных составляющих в спектре его шума и по нему определена скорость вращения гребного вала [15], а также если имеется справочник с зависимостями скорости хода от скорости вращения гребного вала (гребных валов) для каждого класса объектов.

Курс объекта может быть вычислен по формуле [16]

$$K = K_p - \arcsin \left[ \frac{V_n}{V} \cdot \sin(K_p - K_n) \right], \quad (7)$$

где  $K_p$  – относительный курс объекта, рассчитываемый по формуле, вывод которой приведен в приложении 1:

$$K_p = \arctg \frac{\sin(P_k - P_1) \cdot (t_N - t_k) \cdot \sin(P_N) - \sin(P_N - P_k) \cdot (t_k - t_1) \cdot \sin(P_1)}{\sin(P_k - P_1) \cdot (t_N - t_k) \cdot \cos(P_N) - \sin(P_N - P_k) \cdot (t_k - t_1) \cdot \cos(P_1)}. \quad (8)$$

Здесь  $P_1, P_k, P_N$  – пеленги объекта из массива пеленгов  $P_1, \dots, P_N$  измеренных на одном галсе прямолинейного движения в моменты времени  $t_1, \dots, t_N$ , причем для повышения точности оценки курса объекта пеленг  $P_k$ , соответствующий времени  $t_k$ , должен быть примерно равным среднему арифметическому из пеленгов  $P_1$  и  $P_N$ .

Таким образом, оценка курса объекта является функцией его скорости и массива пеленгов. Условная (в зависимости от скорости) ПРВ курса объекта имеет вид:

$$g_{\hat{K}/V}(k) = \delta \left( k - K_p + \arcsin \left[ \frac{V_n}{V} \cdot \sin(K_p - K_n) \right] \right), \quad (9)$$

где  $\delta(x)$  – дельта-функция;  $k$  – неслучайный аргумент ПРВ оценки курса.

Из формулы (7) следует, что если скорость наблюдателя много меньше скорости объекта, то относительный курс объекта близок к его курсу, а если наблюдатель неподвижен, то равен ему.

Дистанцию до цели будем определять совместно энергетическим (по абсолютному уровню сигнала объекта) и спектральным (по наклону спектра сигнала объекта) методами [11], которые реализуются путем измерения уровней сигнала объекта в  $M$  (как правило, трех) частотных диапазонах (ЧД) режима шумопеленгования. Соответствующая стохастическая модель имеет вид:

$$\hat{W}_k = W_k(P_0, r) + \Delta W_k, \quad k=1, \dots, M, \quad (10)$$

где  $\hat{W}_k$  – оценка уровня сигнала объекта в  $k$ -м ЧД, дБ;

$M$  – количество ЧД в режиме шумопеленгования;

$W_k(P_0, r)$  – неслучайная функция, связывающая фактическое значение уровня сигнала объекта в  $k$ -м ЧД, дБ, с шумностью объекта  $P_0$ , дБ, и дистанцией до него  $r$ , км;  $\Delta W_k$  – относительная погрешность измерения уровня сигнала объекта в  $k$ -м ЧД, дБ. Предположим, что она распределена по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{\Delta W_k}$ , вычисляемым по формуле, вывод которой приведен в приложении 2:

$$\sigma_{\Delta W_k} = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{\sqrt{(q_k + 1)^2 + 1}}{q_k \cdot \sqrt{\Delta f_k \cdot T_k}} \right]. \quad (11)$$

Здесь  $q_k$  – отношение «сигнал–помеха» (по мощности) на выходе линейной части приемного тракта в  $k$ -м ЧД;

$\Delta f_k, T_k$  – ширина полосы частот, Гц, и время накопления, с, в  $k$ -м ЧД соответственно.

Заметим, что знаменатель в правой части формулы (11) равен индикаторному отношению «сигнал–помеха», которое при пороге обнаружения в среднем равно 5. Ввиду этого относительная погрешность измерения уровня порогового сигнала  $\sigma_{\Delta W_k}$  не превышает 1 дБ.

Функцию  $W_k(P_0, r)$  представим как

$$W_k(P_0, r) = P_0 + K_k(r) + H_k, \quad (12)$$

где  $K_k(r)$  – передаточная характеристика гидроакустического канала распространения шума объекта от точки излучения до входа приемной антенны в  $k$ -м ЧД, дБ, вычисляемая по приближенной формуле [17]:

$$K_k(r) \approx -20 \cdot \lg f_{ekv_k} + 10 \cdot \lg(f_{\sigma_k} - f_{\eta_k}) - \beta(f_{ekv_k}) \cdot r + 10 \cdot \lg A(f_{ekv_k}, r) - 20 \cdot \lg r - 60, \quad (13)$$

$f_{\eta_k}, f_{\sigma_k}$  – нижняя и верхняя граничные частоты  $k$ -го ЧД;

$f_{ekv_k} = \sqrt{f_{\eta_k} \cdot f_{\sigma_k}}$  – эквивалентная частота  $k$ -го ЧД;

$\beta(f)$  – частотная зависимость коэффициента пространственного затухания в рассматриваемом районе моря;

$A(f, r)$  – частотная зависимость аномалии распространения сигнала в функции дистанции, предполагаемой глубины погружения объекта и глубины наблюдателя для рассматриваемого района моря;

$H_k$  – коэффициент передачи приемного тракта ГАК в  $k$ -м ЧД, дБ. Поскольку этот параметр в процессе калибровки приемного тракта измеряется с высокой точностью, в дальнейшем будем его считать неслучайной величиной.

Учитывая, что в правой части формулы (10) случайной величиной является только относительная погрешность измерения уровня сигнала объекта в  $k$ -м ЧД  $\Delta W_k$ , условную (в зависимости от шумности объекта  $P_0$  и коэффициента передачи  $K_k(r)$ ) ПРВ оценки уровня сигнала в  $k$ -м ЧД можно записать в виде [14]

$$g_{\hat{W}_k/P_0, K_k(r)}(w_k) = g_{\Delta W_k}(w_k - P_0 - K_k(r) - H_k), \quad (14)$$

где  $g_{\Delta W_k}(w_k)$  – ПРВ погрешности измерения уровня сигнала в  $k$ -м ЧД.

Поскольку уровни шума объекта измеряются в разных частотных диапазонах, погрешности их измерения являются независимыми. В результате совместная условная ПРВ оценок уровня сигнала в  $M$  частотных диапазонах равна произведению ПРВ оценок уровней в отдельных частотных диапазонах:

$$g_{\hat{W}_1, \dots, \hat{W}_M/P_0, K_1(r), \dots, K_M(r)}(w_1, \dots, w_M) = \prod_{k=1}^M g_{\Delta W_k}(w_k - P_0 - K_k(r) - H_k). \quad (15)$$

Для определения дистанции по критерию максимального правдоподобия, т.е. для получения максимально правдоподобной оценки (МП-оценки) дистанции до объекта необходимо [18]:

- задать оценку шумности обнаруженного объекта  $\hat{P}_0$  и подставить ее в формулу (15) вместо неслучайной шумности  $P_0$ ;
- рассчитать зависимости коэффициента передачи  $\hat{K}_k(r)$  от дистанции для каждого частотного диапазона и подставить их в формулу (15) вместо неслучайных зависимостей  $K_k(r)$ ;
- в формулу (15) вместо неслучайных аргументов  $w_k$  подставить оценки уровней шума объекта в ЧД  $\hat{W}_k$ .

В результате этих процедур формула (15) преобразуется в функцию правдоподобия, зависящую только от дистанции до цели [18]:

$$g_{\hat{W}_1, \dots, \hat{W}_M/r}(\hat{W}_1, \dots, \hat{W}_M) = \prod_{k=1}^M g_{\Delta W_k}(\hat{W}_k - \hat{P}_0 - \hat{K}_k(r) - H_k). \quad (16)$$

Максимально правдоподобная оценка расстояния до объекта соответствует глобальному максимуму правой части формулы (16):

$$\hat{R}_{opt} = \arg \max_r \prod_{k=1}^M g_{\Delta W_k}(\hat{W}_k - \hat{P}_0 - \hat{K}_k(r) - H_k). \quad (17)$$

Поскольку ПРВ погрешностей измерения уровней шума в ЧД предположительно можно считать нормальными ПРВ с нулевыми математическими ожиданиями и вычисляемыми по формуле (11) среднеквадратическими отклонениями, формулу (17) упростим, заменив в правой части произведение на сумму и максимизацию на минимизацию:

$$\hat{R}_{opt} = \arg \min_r \sum_{k=1}^M \frac{(\hat{W}_k - \hat{P}_0 - \hat{K}_k(r) - H_k)^2}{\sigma_{\Delta W_k}^2}. \quad (18)$$

Так как на предельной дистанции шум объекта, как правило, обнаруживается не во всех частотных диапазонах, причем в большинстве случаев в одном, учтем этот факт в формуле (18), введя в нее индикаторы  $I_k$  обнаружения шума объекта в каждом ЧД, принимающие значение 1, если шум обнаружен, и 0, если нет:

$$\hat{R}_{opt} = \arg \min_r \sum_{k=1}^M I_k \cdot \frac{(\hat{W}_k - \hat{P}_0 - \hat{K}_k(r) - H_k)^2}{\sigma_{\Delta W_k}^2}. \quad (19)$$



Оценим точность определения дистанции до объекта с использованием алгоритма (19). На нее влияют 3 фактора:

- 1) точность оценки шумности обнаруженного объекта  $\hat{P}_0$ ;
- 2) точность расчета передаточной характеристики гидроакустического канала распространения сигнала в каждом ЧД  $\hat{K}_k(r)$ ;
- 3) точность измерения уровня сигнала в каждом ЧД  $\hat{W}_k$ .

Рассмотрим эти факторы. Оценить шумность обнаруженного объекта можно достаточно точно, если знать его класс и среднюю шумность таких объектов в районе плавания. Ввиду этого целесообразно поступить так же, как это было сделано выше в отношении скорости: для каждого класса объектов, которые встречаются в районе плавания, определять расстояние путем подстановки в алгоритм (19) наиболее вероятной для соответствующего класса шумности. Информацию о том, как распределяются шумности каждого класса объектов в каждом районе, достаточно легко почерпнуть из справочников либо из анализа экспериментальных данных (см., например, [19]). Для большинства классов объектов распределение шумности можно аппроксимировать нормальной ПРВ с некоторым средним значением и среднеквадратическим отклонением 2,0-2,5 дБ.

Передаточная характеристика канала распространения сигнала в каждом ЧД  $\hat{K}_k(r)$  рассчитывается по формуле (13), в которой источниками погрешностей могут выступать частотная зависимость коэффициента пространственного затухания, если она недостаточно точно априорно измерена для района плавания, и аномалия распространения сигнала. Последняя вычисляется по лучевой программе, имеющейся в составе каждого современного ГАК ПЛ [20]. Исследования показали, что погрешности расчета аномалии обусловлены в основном неточными данными о гидроакустических условиях в районе (главным образом, вертикальное распределение скорости звука), а также глубиной объекта, если это ПЛ. Кроме того, выяснилось, что погрешность расчета передаточной характеристики канала распространения сигнала не флюктуирует вдоль дистанции, а ведет себя как постоянная ошибка смещения. При оснащении ПЛ измерителями скорости звука с обрывными датчиками, способными измерять вертикальное распределение скорости звука до глубины 1000 м с высокой точностью [21], погрешность расчета передаточной характеристики канала распространения хорошо аппроксимируется нормальным законом распределения с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением 1,5 дБ в случае надводного объекта и 2,0 дБ в случае ПЛ.

Распределение погрешности измерения уровня сигнала также подчиняется предположительно нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением, определяемым по формуле (11). При этом заметим, что данная погрешность вносит наименьший вклад в погрешность оценки расстояния до объекта. Вследствие этого повышение точности измерения уровней сигнала в ЧД с ростом отношения «сигнал–помеха» практически не скажется на точности определения дистанции, поскольку два ранее рассмотренных фактора от времени и отношения «сигнал–помеха» не зависят.

С учетом сказанного в формуле (19) необходимо указать, что предполагаемая шумность объекта и передаточная характеристика распространения шума, а также сама оценка дистанции зависят от класса объекта  $\omega$ :

$$\hat{R}_{opt/\omega} = \arg \min_r \sum_{k=1}^M I_k \cdot \frac{\left( \hat{W}_k - \hat{P}_{0/\omega} - \hat{K}_{k/\omega}(r) - H_k \right)^2}{\sigma_{\Delta W_k}^2}. \quad (20)$$

Поскольку при условии нормировки функцию правдоподобия дистанции можно рассматривать в качестве ее ПРВ, она позволяет оценить апостериорную среднеквадратическую погрешность оценки расстояния до объекта [18]:

$$\sigma_{\hat{R}_{opt/\omega}}^2 = \frac{\int_{mP_{0/\omega}-2sP_{0/\omega}}^{mP_{0/\omega}+2sP_{0/\omega}} g_{P_0}(p) \cdot \int_{-2\sigma_{\Delta K_\omega}}^{2\sigma_{\Delta K_\omega}} g_{\Delta K}(\Delta k) \cdot [R(p, \Delta k) - \hat{R}_{opt/\omega}]^2 \cdot dp \cdot d\Delta k}{\int_{mP_{0/\omega}-2sP_{0/\omega}}^{mP_{0/\omega}+2sP_{0/\omega}} g_{P_0}(p) \cdot \int_{-2\sigma_{\Delta K_\omega}}^{2\sigma_{\Delta K_\omega}} g_{\Delta K}(\Delta k) \cdot dp \cdot d\Delta k}, \quad (21)$$

где  $R(p, \Delta k)$  – оценка дистанции до объекта, вычисляемая по формуле (20) при подстановке в нее  $p$  вместо  $\hat{P}_0$  и  $\hat{K}_k(r) + \Delta K$  вместо  $\hat{K}_k(r)$ .

В результате ПРВ оценки расстояния до объекта в момент времени  $t_j$  представима в виде

$$g_{R_j/\omega}(r) = norm\left(r \parallel R_{opt/\omega}; \sigma_{R_{opt/\omega}}\right). \quad (22)$$

Теперь получены все данные для построения совместной ПРВ оценок пеленгов, скорости, курса и дистанции:

$$\begin{aligned} & g_{\hat{P}_1, \dots, \hat{P}_N, K, V, R_j}(p_1, \dots, p_N, k, v, r) = \\ & = g_{R_j/\omega}(r) \cdot g_{\hat{K}/V}(k) \cdot g_{V/\omega}(v) \cdot g_{\hat{P}_1, \dots, \hat{P}_N/K, V, R_j}(p_1, \dots, p_N) = \\ & = norm\left(r \parallel R_{opt/\omega}; \sigma_{R_{opt/\omega}}\right) \cdot \delta\left(k - K_p + \arcsin\left[\frac{V_n}{v} \cdot \sin(K_p - K_n)\right]\right) \times \\ & \times norm\left(v \parallel mV_\omega; sV_\omega\right) \cdot \prod_{i=1}^N norm\left(p_i - P(t_i, k, v, r_j) \parallel 0; \sigma_{P_i}\right). \end{aligned} \quad (23)$$

Курс, скорость и дистанция, соответствующие глобальному максимуму ПРВ (23), – максимально правдоподобные оценки КПД объекта класса  $\omega$ :

$$\begin{aligned} & \left(\hat{K}_{opt}, \hat{V}_{opt}, \hat{R}_{opt/j}\right) = \arg \max_{k, v, r} g_{\hat{P}_1, \dots, \hat{P}_N, K, V, R_j}\left(\hat{P}_1, \dots, \hat{P}_N, k, v, r\right) = \\ & = \arg \max_{v, r} \left\{ norm\left(r \parallel R_{opt/\omega}; \sigma_{R_{opt/\omega}}\right) \cdot \delta\left(k - K_p + \arcsin\left[\frac{V_n}{v} \cdot \sin(K_p - K_n)\right]\right) \times \right. \\ & \left. \times norm\left(v \parallel mV_\omega; sV_\omega\right) \cdot \prod_{i=1}^N norm\left(\hat{P}_i - P(t_i, k, v, r_j) \parallel 0; \sigma_{P_i}\right) \right\}. \end{aligned} \quad (24)$$

Учитывая, что все ПРВ в правой части (24) являются нормальными, упростим формулу (24), заменив в ней произведения на суммы, а максимизацию на минимизацию:

$$\left(\hat{K}_{opt}, \hat{V}_{opt}, \hat{R}_{opt/j}\right) = \arg \min_{v, r} \left\{ \frac{(r - R_{opt/\omega})^2}{\sigma_{R_{opt/\omega}}^2} + \frac{(v - mV_\omega)^2}{sV_\omega^2} + \sum_{i=1}^N \frac{(\hat{P}_i - P(t_i, k, v, r_j))^2}{\sigma_{P_i}^2} \right\}. \quad (25)$$

Поскольку нет основания считать, что минимизируемый функционал одномерный, поиск минимума необходимо осуществлять простым перебором возможных значений дистанции и скорости.

Суть алгоритма (25) состоит в том, что массив оценок пеленгов корректирует значения оценок скорости и дистанции путем вписывания их в модель движения (1) и (3). Вместе с тем, если пеленг на интервале решения задачи не изменяется либо из-



меняется очень медленно по сравнению с погрешностью его измерения, коррекции не происходит. Причинами этого могут быть большая дистанция до объекта либо то, что объект движется курсом сближения вплотную. В этих случаях за оценки КПД объекта принимаются:

- в качестве оценки скорости – средняя скорость объекта рассматриваемого класса  $\omega$  объектов  $mV_{\omega}$ ;
- в качестве оценки относительного курса – обратный пеленг объекта, равный относительному курсу при движении курсом сближения вплотную;
- оценка курса, которая рассчитывается по формуле (7) с использованием оценок скорости и относительного курса;
- в качестве оценки дистанции – дистанция, вычисленная с помощью алгоритма (20).

Как было отмечено выше, задача определения КПД решается циклически с периодом измерения пеленгов. В конце каждого цикла оценки скорости, дистанции и курса объекта, полученные на  $L$  предшествующих циклах (включая текущий цикл), сглаживаются с использованием робастного алгоритма, состоящего в следующем:

- все  $L$  оценок одного параметра ранжируются в порядке увеличения либо уменьшения их значений;
- из ранжированного ряда удаляются 10-20% минимальных и максимальных по величине оценок;
- с помощью оставшихся оценок вычисляется среднее арифметическое, которое приписывается времени, соответствующему среднему времени  $L$  исходных оценок.

Количество циклов сглаживания  $L$  определяется на основе компромисса между величиной уменьшения флуктуаций оценок КПД и временем запаздывания получения результата и составляет 20-30.

Чтобы еще уменьшить флуктуации оценок КПД, процедуру сглаживания можно повторить дважды.

На каждом  $N$ -м цикле решения задачи проверяется, маневрирует ли объект наблюдения. Считается, что объект совершает маневр, если выявлен хотя бы один из следующих факторов [22].

1. Резко изменилась скорость изменения пеленга, что соответствует маневрированию объекта курсом либо скоростью. Соответствующее решение принимается, если выполняется условие

$$\left| \hat{P}_{N-S} + \dot{P}_{L-S} \cdot (t_N - t_{N-S}) - \hat{P}_N \right| > 4,5 \cdot \sigma_P, \quad (26)$$

где  $\dot{P}_{L-S}$  – скорость изменения пеленга, вычисляемая в виде

$$\dot{P}_{L-S} = \frac{\hat{P}_{N-S} - \hat{P}_{N-L}}{t_{N-S} - t_{N-L}}, \quad (27)$$

$N$  – номер последнего замера пеленга;  $\sigma_P$  – среднеквадратическая погрешность измерения пеленга;  $S = 1 \dots 3$ ;  $L = 20 \dots 30$ .

2. Изменилась скорость вращения гребного вала (гребных валов), наблюдаемая по звукоряду дискретных составляющих в спектре амплитудной огибающей шума объекта, вследствие чего изменилась скорость объекта. Соответствующее решение принимается, если на двух последовательных циклах вычисления амплитудной огибающей шума объекта выполняется условие

$$|\tilde{F} - F_N| > 3 \cdot \sigma_F, \quad (28)$$

где  $\tilde{F}$  – средняя скорость вращения гребного вала объекта, измеренная на предыдущих  $B$  циклах вычисления амплитудной огибающей шума объекта, не считая двух последних циклов;

$F_N$  – скорость вращения гребного вала объекта, измеренная на последнем цикле вычисления амплитудной огибающей шума объекта;

$\sigma_F$  – среднеквадратическая погрешность измерения частоты вращения гребного вала, равная разрешающей способности спектрального анализа амплитудной огибающей шума объекта.

3. Внезапное появление несколько близких по частоте звукорядов дискретных составляющих в спектре амплитудной огибающей шума объекта, что обусловлено маневрированием объекта по курсу. Это обнаруживается в процессе анализа спектра амплитудной огибающей шума объекта.
4. Резко изменился уровень шума объекта, что свидетельствует об изменении скорости либо глубины объекта. Соответствующее решение принимается при условии

$$|\tilde{W}_N - \hat{W}_N| > 4,5 \cdot \sigma_W, \quad (29)$$

где  $\tilde{W}_N$  – средний уровень шума объекта, вычисленный в наиболее высокочастотном диапазоне на предыдущих  $F$  циклах измерения уровней сигнала в частотных диапазонах, не считая 3-х последних циклов;

$\hat{W}_N$  – уровень шума объекта, измеренный в том же частотном диапазоне на последнем цикле;

$\sigma_{\Delta W}$  – среднеквадратическая погрешность измерения уровня шума объекта в том же частотном диапазоне.

## 2. Описание алгоритма

Чтобы обеспечить работу алгоритма, в память ГАК для каждого класса  $\omega$  морских объектов, которые потенциально могут обнаруживаться в данном районе, должны быть записаны:

- среднее значение скорости  $m_{V/\omega}$  и ее среднеквадратический разброс  $\sigma_{V/\omega}$ ;
- зависимость скорости хода от скорости вращения гребного вала (гребных валов)  $V_\omega(Y_{ГВ})$ , где  $Y_{ГВ}$  – скорость вращения гребного вала (валов);
- зависимость среднего значения приведенной шумности от скорости хода  $mP_{0/\omega}(V)$  и ее среднеквадратический разброс  $sP_{0/\omega}(V)$ .

При прибытии в район для гидроакустических условий рассчитываются с помощью лучевой программы передаточные характеристики канала распространения шума объекта  $K_{k/\omega}(r)$ ,  $k = 1, \dots, M$ , в каждом ЧД для каждого класса объектов и текущей глубины своей ПЛ.

Задача определения КПД обнаруженного объекта решается одновременно для каждого класса объектов, которые могут быть обнаружены в районе плавания. При этом для конкретного класса из таблиц и графиков, подготовленных для района плавания, выбираются приведенные выше шумоскоростные характеристики объекта, а также рассчитанные передаточные характеристики канала распространения шума

объекта в каждом ЧД. В качестве скорости принимается ее среднее значение для объекта рассматриваемого класса  $V_{\omega} = m_{V/\omega}$ .

Определение КПД начинается с момента обнаружения объекта с циклом обработки входных данных в режиме шумопеленгования ( $t_1$  – момент времени обнаружения объекта,  $t_N$  – момент времени текущего  $N$ -го цикла). На каждом цикле реализуется ряд процедур:

- 1) по формулам (26)–(28) выявляется, маневрирует ли объект. Если маневр обнаружен, считается, что это начало нового прямолинейного галса объекта. Полученные на момент завершения предыдущего цикла решения задачи оценки КПД принимаются за их начальные приближения на текущем галсе;
- 2) измеряются пеленг объекта, отношение «сигнал–помеха» в каждом ЧД и уровни шума в тех ЧД, где отношение «сигнал–помеха» превысило пороговое значение;
- 3) по формуле (2) с учетом измеренного отношения «сигнал–помеха» вычисляется среднеквадратическая погрешность оценки пеленга  $\sigma_p$ ;
- 4) по формуле (11) вычисляются среднеквадратические погрешности оценок уровней шума объекта в каждом ЧД  $\sigma_{\Delta W_k}$ ;
- 5) при выполнении условия

$$|P_N - P_1| > 4,5 \cdot \sigma_p, \quad (30)$$

т.е. когда величина изменения пеленга с момента обнаружения объекта до текущего момента времени  $t_N$  превысила предельную погрешность вычисления разности пеленгов, по формуле (8) рассчитывается оценка относительного курса объекта, за который до этого времени принимается обратный пеленг. Обусловлено это тем, что отсутствие статистически подтвержденного изменения пеленга на интервале времени наблюдения объясняется либо большой дистанцией до объекта (в этом случае точность определения относительного курса объекта не принципиальна), либо тем, что объект движется курсом сближения вплотную (в этом случае его относительный курс равен обратному пеленгу);

- 6) по формуле (7) с учетом скорости цели  $V_{\omega}$  и параметров движения наблюдателя вычисляется оценка курса объекта;
- 7) по формуле (20) определяется оценка дистанции до объекта, а по формуле (21) – ее среднеквадратическая погрешность;
- 8) оценки пеленгов, скорости и дистанции подставляются в формулу (25), затем в пределах возможных значений скорости, курса и дистанции путем их прямого перебора в обозначенных интервалах ищется ее глобальный минимум. При этом путем моделирования установлено, что количество значений, на которые разбивается каждый интервал, должно быть не меньше 20. После нахождения глобального минимума функции правдоподобия (25) соответствующие ему значения скорости, курса и дистанции принимаются за их максимально правдоподобные оценки на текущем цикле решения задачи;
- 9) оценки скорости, дистанции и курса объекта, полученные на  $L$  последних циклах решения задачи, сглаживаются за счет описанного выше робастного алгоритма.

Результатом работы алгоритма на каждом цикле решения задачи являются оценки КПД объекта наблюдения, соответствующие каждому классу объектов, которые потенциально могут быть обнаружены в районе плавания. Это позволяет каждое решение о классе наблюдаемого объекта сопроводить подходящими этому классу оценками КПД. Заметим, что многоальтернативная стратегия определения КПД должна

применяться на протяжении всего наблюдения объекта, поскольку не исключена вероятность, что решение о классе объекта в процессе его наблюдения будет изменено.

### 3. Моделирование алгоритма

Моделирование алгоритма выполнялось, чтобы оценить обеспечиваемую им точность определения КПД обнаруженного объекта.

Моделирование проводилось путем многократного повторения одной и той же ситуации: объект с известными шумоскоростными характеристиками в заданных гидроакустических условиях сближался с носителем ГАК. Всякий раз объект обнаруживался, когда уровень шума превышал пороговое значение хотя бы в одном ЧД приемного тракта ГАК, и циклически (с заданным периодом) определялись его КПД. При этом при каждом повторении случайным образом моделировались скорость и шумность обнаруженного объекта в соответствии с ПРВ, зависящими от его класса, и погрешность расчета передаточной характеристики канала. На каждом цикле определения КПД моделировались погрешности измерения пеленга и уровней шума в каждом ЧД приемного тракта. В соответствии с описанной выше стратегией КПД обнаруженного объекта рассчитывались одновременно для нескольких предполагаемых классов.

После каждого повторения формировалась зависимость оценок курса, скорости и дистанции до объекта и их погрешностей от времени для каждого предполагаемого класса объекта, а по результатам всех повторений вычислялись зависимости от времени среднеквадратических погрешностей определения курса, скорости и дистанции, учитывающих влияние всех факторов.

Моделирование выполнялось для следующих условий.

1. В качестве акватории плавания рассматривался удаленный от берегов район океана, в котором за редким исключением могут быть обнаружены только крупные торговые суда (главным образом, транспорты), большие боевые корабли классов «крейсер» и «фрегат» и атомные ПЛ. Средние значения ( $mV_{\omega}$ ,  $mP_{0/\omega}$ ) и среднеквадратический разброс ( $\sigma V_{\omega}$ ,  $\sigma P_{0/\omega}$ ) их скоростей и шумностей приведены в табл. 1. На рис. 1 представлены соответствующие им усредненные зависимости приведенной шумности от скорости хода.

Таблица 1

Шумоскоростные характеристики объектов трех классов

$\omega$	Название класса	$mV_{\omega}$ , м/с	$\sigma V_{\omega}$ , м/с	$mP_{0/\omega}$ , дБ	$\sigma P_{0/\omega}$ , дБ
1	Атомная ПЛ (АПЛ)	3,75	0,63	62,0	2,5
2	Большой надводный корабль (НК)	9,0	1,0	100,0	2,5
3	Крупный транспорт (ТР)	7,5	1,0	107,0	2,5

2. В качестве обнаруженных объектов, КПД которых определялись, рассматривались атомная ПЛ и транспорт.
3. ПЛ-цель в процессе решения задачи двигалась на глубине 200 м двумя прямолинейными галсами на скорости 4 м/с. Курс на первом галсе составлял 270°, на

втором –  $210^\circ$ , фактическая шумность ПЛ на скорости 4 м/с – 63 дБ. Каждый галс длился по 20 мин.

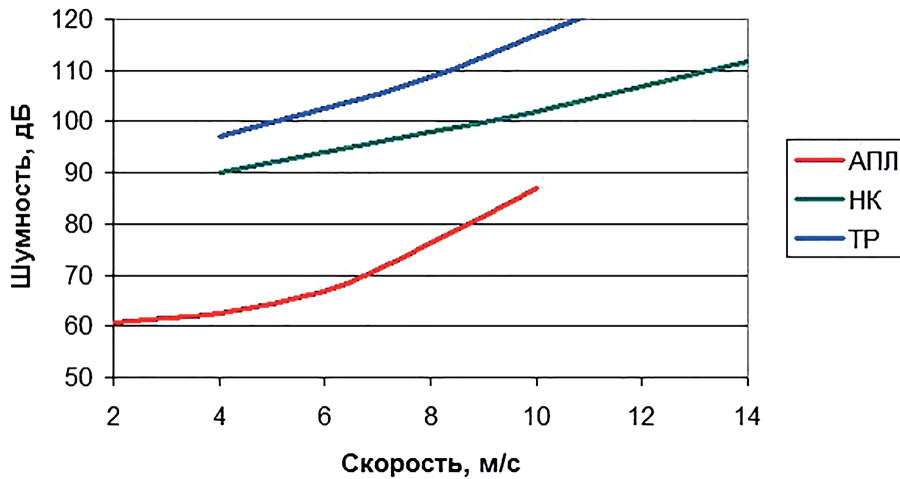


Рис. 1. Усредненные зависимости приведенной шумности морских объектов от скорости их хода

- Обнаружение ПЛ осуществлялось на предельной дистанции 11,2 км на курсовом угле ПЛ-наблюдателя  $26^\circ$  левого борта.
- Транспорт в процессе наблюдения также двигался двумя прямолинейными галсами, каждый из которых длился по 20 мин, курсами  $300^\circ$  и  $260^\circ$ . Скорость на первом галсе составляла 6,5 м/с, шумность – 105 дБ. На втором галсе скорость увеличилась до 8,5 м/с, шумность – до 109 дБ.
- Рассматривались 2 варианта обнаружения транспорта. В первом транспорт был замечен на предельной дистанции обнаружения 110 км, во втором – на расстоянии 30 км при выходе из створа с другими надводными кораблями. В обоих случаях обнаружение происходило на курсовом угле левого борта ПЛ-наблюдателя.
- Во всех эпизодах ПЛ-наблюдатель двигался прямолинейно и равномерно на глубине 100 м со скоростью 2,5 м/с и курсом  $90^\circ$ .
- Вертикальное распределение скорости звука в районе представлено на рис. 2.

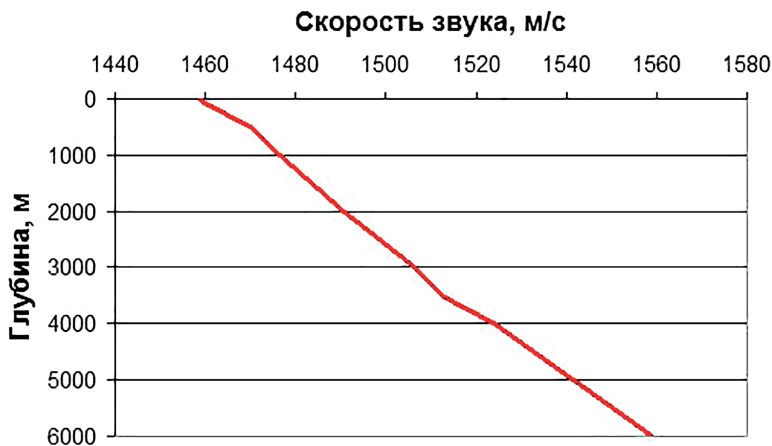


Рис. 2. Вертикальное распределение скорости звука в районе

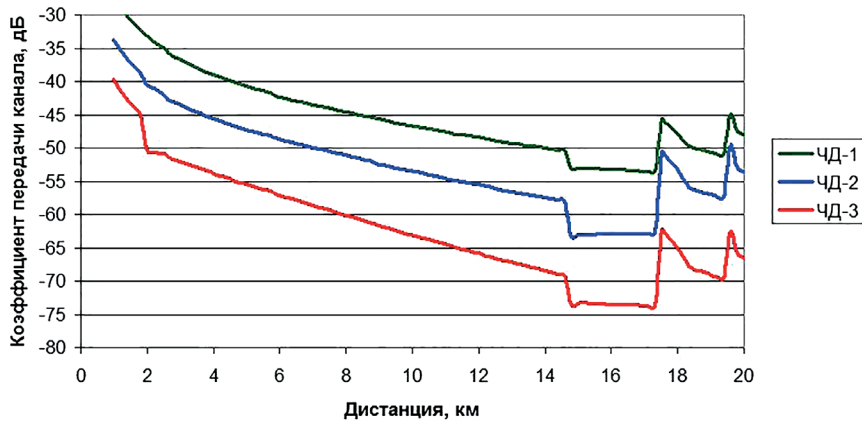
Приведенный уровень шумов моря – 31 дБ.

Исходные данные для моделирования каждого эпизода следующие:

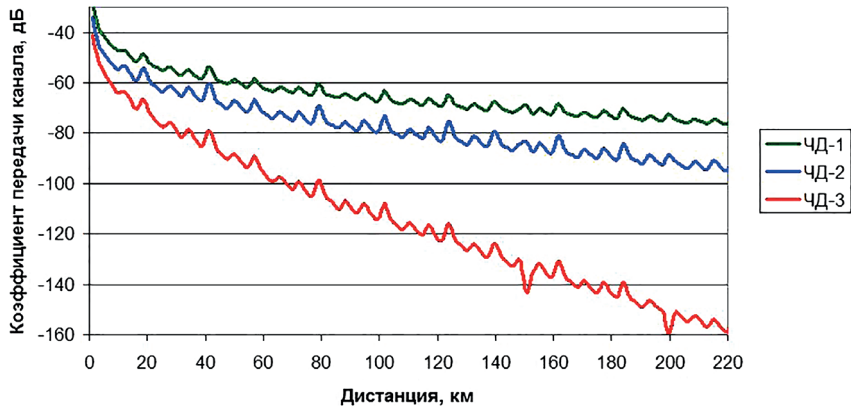
- фактический класс объекта наблюдения;
- количество галсов движения объекта наблюдения, длительность каждого галса;
- начальные декартовы координаты, курс и глубина объекта наблюдения на каждом галсе, скорость и шумность объекта варьировались в пределах, соответствующих классу моделируемого объекта;
- начальные декартовы координаты, курс, скорость, глубина ПЛ-наблюдателя в процессе решения задачи.

Задача определения КПД обнаруженного объекта в каждом из эпизодов решалась по многоальтернативной стратегии, т.е. одновременно применительно к трем классам объектов, которые могут быть обнаружены в районе плавания (табл. 1).

До начала моделирования для заданных гидроакустических условий рассчитывались с использованием лучевой программы фактические передаточные характеристики канала распространения шума в каждом из трех ЧД для каждого из трех классов объектов:  $K_{k/\omega}(r)$ ,  $k = 1, \dots, 3$ ,  $\omega = 1, \dots, 3$  (рис. 3).



а) передаточные характеристики для ПЛ



б) передаточные характеристики для транспорта

Рис. 3. Передаточные характеристики канала распространения шума объекта для ПЛ и транспорта в каждом из трех ЧД режима шумопеленгования

И для ПЛ, и для транспорта моделирование состояло из 1331 повторения (опытов), формируемого перебором по 11 значений (в пределах своих интервалов изме-



нения) фактических скорости  $V$  и шумности  $P_0$  объекта, а также погрешности  $\Delta K_\omega$  вычисления передаточной характеристики канала распространения сигнала.

Погрешность расчета передаточной характеристики канала распространения  $\Delta K_\omega$  добавлялась к полученным фактическим передаточным характеристикам  $K_{k/\omega}(r)$ :

$$\hat{K}_{k/\omega}(r) = K_{k/\omega}(r) + \Delta K_\omega. \quad (31)$$

КПД в каждом опыте оценивались с циклом 10 с. На каждом цикле выполнялись следующие процедуры.

1. По известным формулам, описывающим совместное маневрирование морских объектов [1, 16], вычислялись фактические декартовы координаты объекта наблюдения и ПЛ-наблюдателя, расстояние между ними, пеленг объекта.
2. С использованием фактических зависимостей от дистанции передаточной характеристики канала распространения шума объекта в ЧД  $K_{k/\omega}(r)$ ,  $k = 1, \dots, M$ , определялись фактические коэффициенты передачи, соответствующие текущей дистанции до моделируемого объекта.
3. С привлечением реальных шумности объекта и коэффициентов передачи канала по формулам (12) и (13) вычислялись фактические уровни шума объекта в каждом из трех ЧД (линии черного цвета на рис. 4), а с учетом уровня шумов моря рассчитывались отношения «сигнал–помеха» в тех же ЧД (рис. 5). Далее на данном цикле моделирования во внимание принимались только те диапазоны частот, в которых полученное отношение «сигнал–помеха» превышало порог обнаружения.

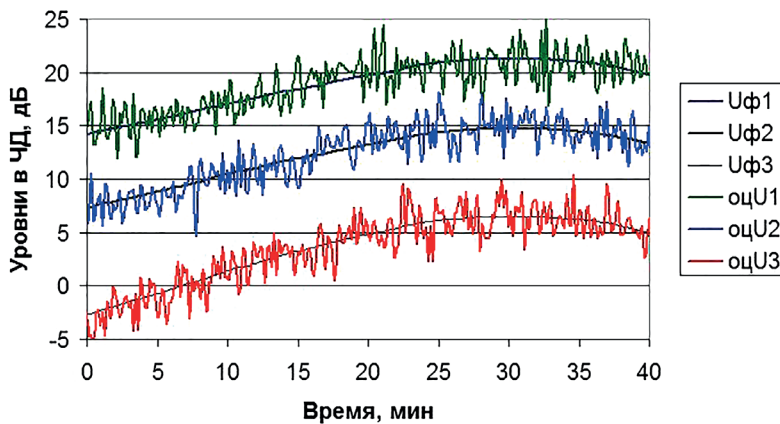


Рис. 4. Зависимости от времени наблюдения за ПЛ фактических уровней шума объекта в трех ЧД (сплошные линии черного цвета) и их оценок (цветные линии)

4. По формуле (11) вычислялись среднеквадратические погрешности измерения уровней шума объекта  $\sigma_{\Delta W_k}$  в диапазонах частот, где отношение «сигнал–помеха» превысило пороговое значение. В соответствии с полученными результатами моделировались погрешности измерения уровней сигнала в частотных диапазонах, которые накладывались на истинные коэффициенты передачи (цветные линии на рис. 4).
5. Согласно алгоритму (20) оценивалась дистанции до объекта  $\hat{R}_{opt/\omega}$  (рис. 6), а по формуле (21) рассчитывалась ее среднеквадратическая погрешность  $\sigma_{\hat{R}_{opt/\omega}}$ .

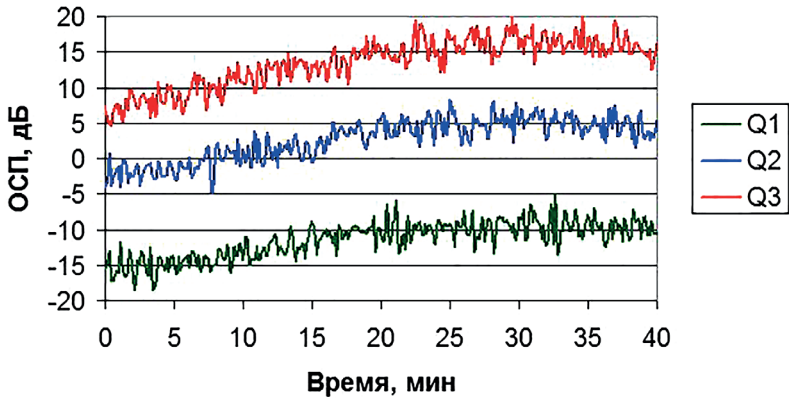


Рис. 5. Зависимости от времени наблюдения за ПЛ оценок отношения «сигнал–помеха» в трех ЧД

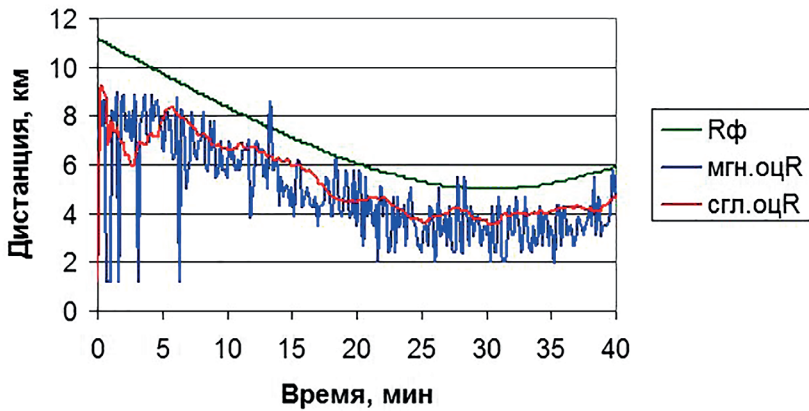


Рис. 6. Зависимости от времени фактической дистанции до объекта (зеленая линия), а также ее мгновенной (синяя линия) и сглаженной (красная линия) оценок

6. В наиболее высокочастотном ЧД, где отношение «сигнал–помеха» превысило пороговое значение, по формуле (2) вычислялась среднеквадратическая погрешность измерения пеленга объекта, с учетом которой моделировалась оценка пеленга объекта  $\hat{P}_i$  на данном цикле решения задачи (рис. 7).

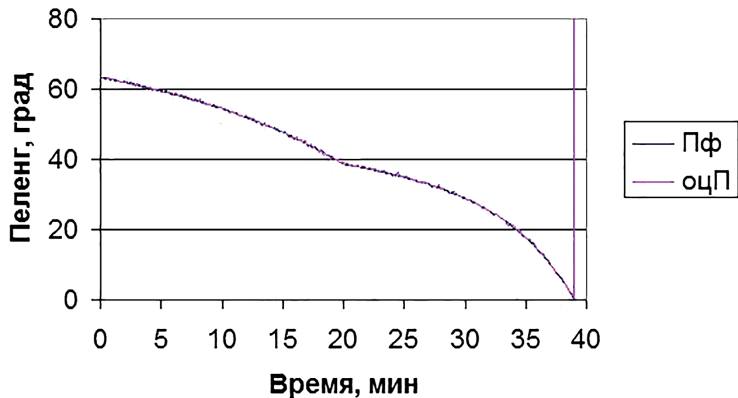


Рис. 7. Зависимости от времени фактического пеленга объекта и его оценки

7. По формуле (8) с использованием оценок пеленгов вычислялся относительный курс объекта (рис. 8), а по формуле (7) с привлечением оценки скорости – курс объекта (рис. 9).

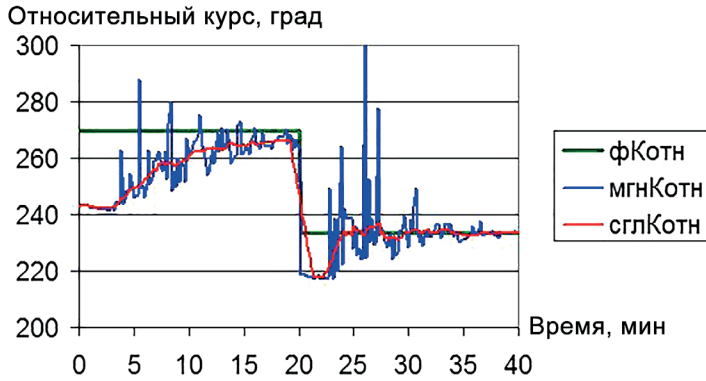


Рис. 8. Зависимости от времени фактического относительного курса ПЛ (зеленая линия), а также его мгновенной (синяя линия) и сглаженной (красная линия) оценок

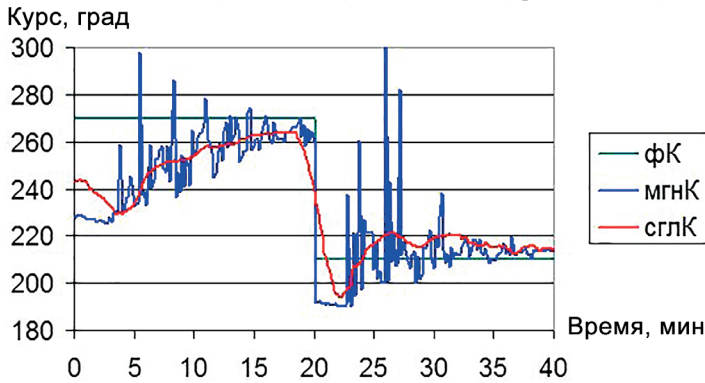


Рис. 9. Зависимости от времени фактического курса ПЛ (зеленая линия), а также его мгновенной (синяя линия) и сглаженной (красная линия) оценок

8. Если изменение пеленга объекта за 3 мин превышает трехкратную среднеквадратическую погрешность его оценки, согласно алгоритму (25) оценивались курс, скорость и дистанция до объекта (рис. 10, 11). В противном случае за оценки КПД объекта принимались названные при обсуждении формулы (25).
9. Оценки, полученные на 19 соседних циклах, сглаживались робастным алгоритмом, который заключался в ранжировании всех 19 оценок в порядке возрастания их значений, отбрасывании двух наибольших и двух наименьших оценок, а также усреднении оставшихся и приписывании результата среднему из 19 циклов (рис. 10, 11).

С использованием зависимостей от времени с момента обнаружения объекта сглаженных оценок его курса, скорости и дистанции, полученных по результатам 1331 опыта, вычислялись зависимости от времени среднеквадратических погрешностей сглаженных оценок КПД:

$$\sigma_K^2(t_i) = \frac{\sum_{n=1}^{11} \left\{ g_{V/\omega}(V_n) \cdot \sum_{m=1}^{11} g_{P_0/\omega}(P_{0/n}) \cdot \left\{ \sum_{s=1}^{11} g_{\Delta K/\omega}(\Delta K_s) \cdot \Delta \tilde{K}_{n,m,s}^2(t_i) \right\} \right\}}{\sum_{n=1}^{11} \left\{ g_{V/\omega}(V_n) \cdot \sum_{m=1}^{11} g_{P_0/\omega}(P_{0/n}) \cdot \left\{ \sum_{s=1}^{11} g_{\Delta K/\omega}(\Delta K_s) \right\} \right\}}, \quad (32)$$

$$\sigma_V^2(t_i) = \frac{\sum_{n=1}^{11} \left\{ g_{V/\omega}(V_n) \cdot \sum_{m=1}^{11} g_{P_0/\omega}(P_{0/n}) \cdot \left\{ \sum_{s=1}^{11} g_{\Delta K/\omega}(\Delta K_s) \cdot \Delta \tilde{V}_{n,m,s}^2(t_i) \right\} \right\}}{\sum_{n=1}^{11} \left\{ g_{V/\omega}(V_n) \cdot \sum_{m=1}^{11} g_{P_0/\omega}(P_{0/n}) \cdot \left\{ \sum_{s=1}^{11} g_{\Delta K/\omega}(\Delta K_s) \right\} \right\}}, \quad (33)$$

$$\sigma_R^2(t_i) = \frac{\sum_{n=1}^{11} \left\{ g_{V/\omega}(V_n) \cdot \sum_{m=1}^{11} g_{P_0/\omega}(P_{0/n}) \cdot \left\{ \sum_{s=1}^{11} g_{\Delta K/\omega}(\Delta K_s) \cdot \Delta \tilde{R}_{n,m,s}^2(t_i) \right\} \right\}}{\sum_{n=1}^{11} \left\{ g_{V/\omega}(V_n) \cdot \sum_{m=1}^{11} g_{P_0/\omega}(P_{0/n}) \cdot \left\{ \sum_{s=1}^{11} g_{\Delta K/\omega}(\Delta K_s) \right\} \right\}}, \quad (34)$$

где  $\sigma_K(t_i)$ ,  $\sigma_V(t_i)$ ,  $\sigma_R(t_i)$  – среднеквадратические погрешности сглаженных оценок курса, скорости и дистанции, соответствующие моменту времени  $t_i$ , отсчитываемому с момента обнаружения объекта;

$g_V(V_n)$  – значение ПРВ фактической скорости объекта  $V_n$ ;

$g_{P_0}(P_{0/m})$  – значение ПРВ шумности объекта  $P_{0/m}$ ;

$g_{\Delta K}(\Delta K_s)$  – значение ПРВ погрешности  $\Delta K_s$  вычисления передаточной характеристики канала распространения сигнала;

$\Delta \tilde{V}_{n,m,s}(t_i)$ ,  $\Delta \tilde{K}_{n,m,s}(t_i)$ ,  $\Delta \tilde{R}_{n,m,s}(t_i)$  – погрешности сглаженных оценок скорости, курса и дистанции, соответствующие моменту времени  $t_i$ , полученные при фактических скорости  $V_n$  и шумности  $P_{0/m}$  и при погрешности вычисления передаточной характеристики канала распространения сигнала  $\Delta K_s$ .

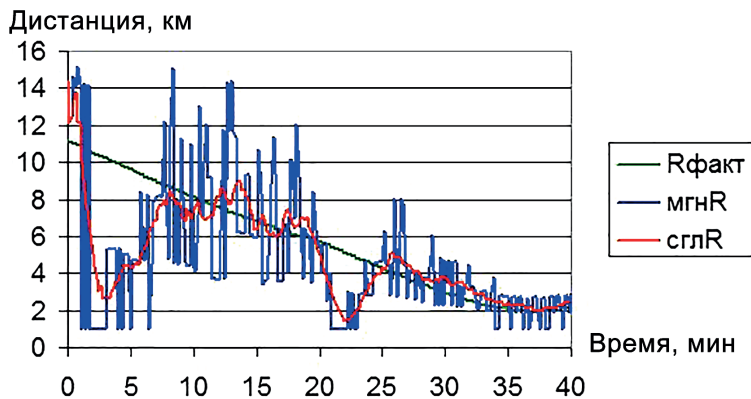


Рис. 10. Зависимости от времени фактической дистанции до ПЛ и ее мгновенной и сглаженной оценок

Результаты расчетов по формулам (32)–(34) приведены на рис. 12–17.

На рис. 12–14 представлены среднеквадратические погрешности сглаженных оценок соответственно курса, скорости и расстояния до объекта для 3-х гипотез о его классе. Реальным классом объекта является ПЛ, что подтверждается малостью погрешностей, соответствующих этому классу. Заметим, что резкое увеличение среднеквадратической погрешности оценки курса объекта свидетельствует о смене галса на 21-й минуте.

На рис. 15–17 приведены среднеквадратические погрешности сглаженных оценок соответственно курса, скорости и дистанции до объекта класса «транспорт» при его обнаружении на расстояниях 110 и 30 км. В первом случае транспорт был

замечен на предельной дистанции, во втором – при выходе из створа с другим, более близким судном. Принципиальное отличие между этими эпизодами заключается в скорости изменения пеленга объекта: 0,05 град/мин в первом случае (т.е. пеленг во времени практически не изменялся) и 1 град/мин во втором.

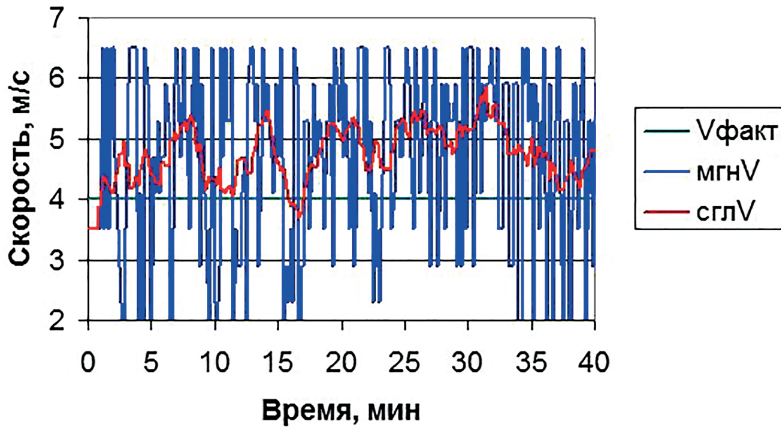


Рис. 11. Зависимости от времени фактической скорости ПЛ и ее мгновенной и сглаженной оценок

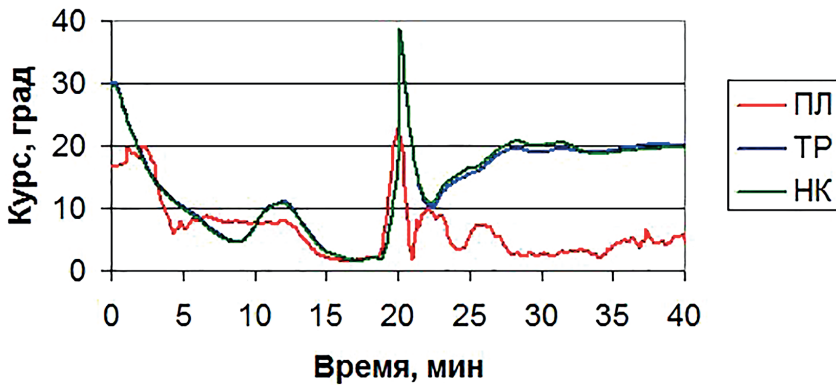


Рис. 12. Зависимости от времени среднеквадратической погрешности определения курса объекта для трех гипотез о его классе. Фактическим классом объекта является ПЛ

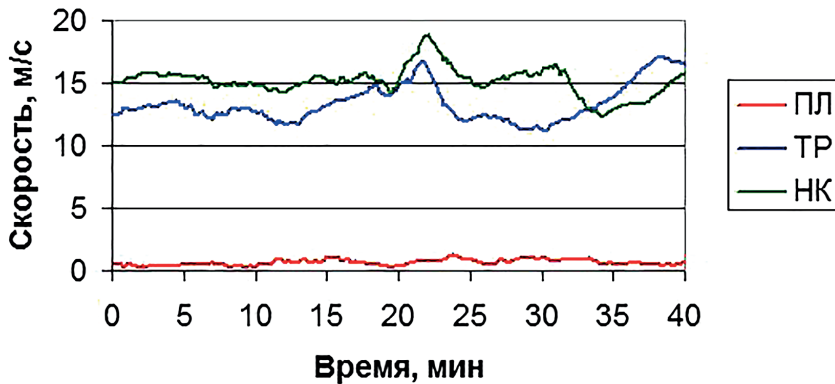


Рис. 13. Зависимости от времени среднеквадратической погрешности определения скорости объекта для трех гипотез о его классе. Фактическим классом объекта является ПЛ

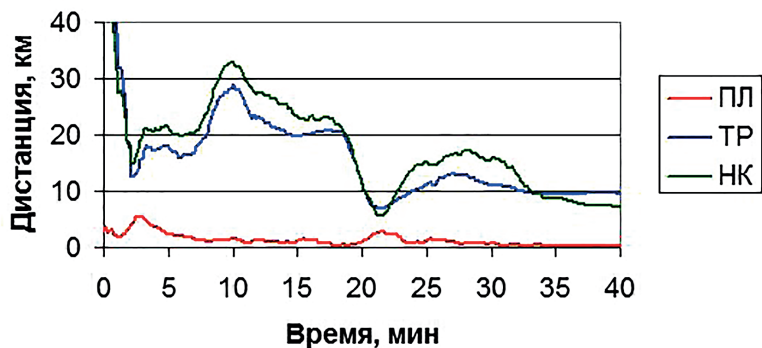


Рис. 14. Зависимости от времени среднеквадратической погрешности определения дистанции до объекта для трех гипотез о его классе. Фактическим классом объекта является ПЛ

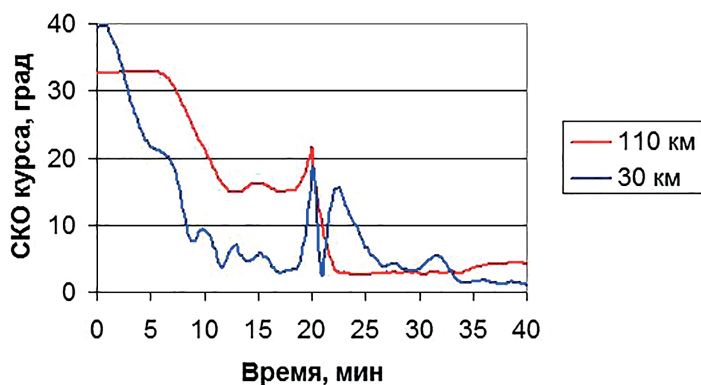


Рис. 15. Зависимости от времени среднеквадратической погрешности определения курса транспорта при его обнаружении на дистанциях 110 и 30 км

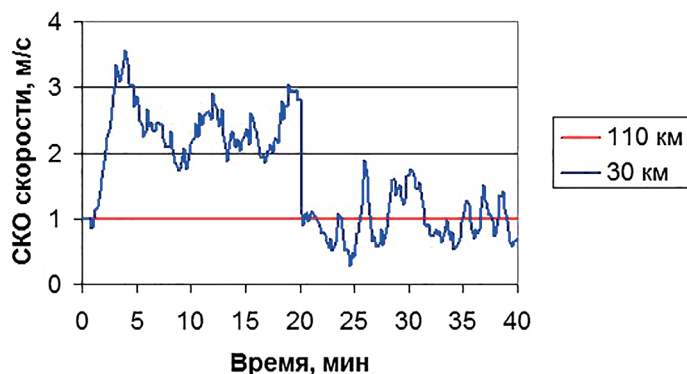


Рис. 16. Зависимости от времени среднеквадратической погрешности определения скорости транспорта при его обнаружении на дистанциях 110 и 30 км

Из рис. 12–17 можно сделать следующие выводы.

1. Как и следовало ожидать, минимальные погрешности определения КПД обнаруженного объекта наблюдаются, когда гипотеза о его классе оказывается верна. Этот факт подтверждает целесообразность стратегии, согласно которой одновременно определяются КПД для нескольких классов объектов, а затем выбираются результаты, релевантные фактическому классу.



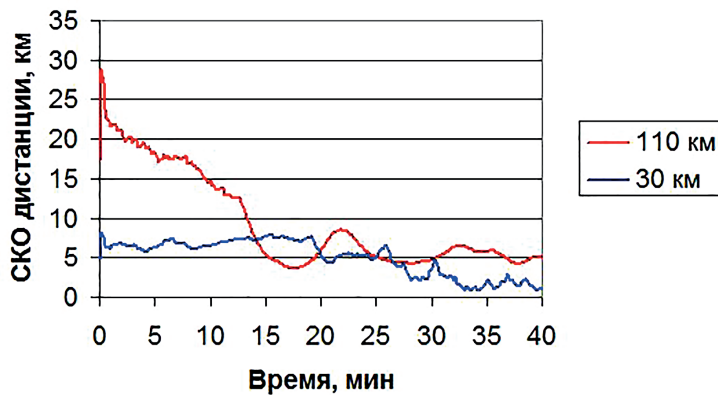


Рис. 17. Зависимости от времени среднеквадратической погрешности определения дистанции до транспорта при его обнаружении на дистанциях 110 и 30 км

2. При обнаружении объекта в течение первых 5-10 минут погрешности КПД уменьшаются от начальных до установившихся значений.
3. Если объект выявлен на расстоянии до 30 км, т.е. когда скорость изменения пеленга составляет 0,5-1,0 град/мин и более, установившиеся значения среднеквадратических погрешностей определения КПД в среднем таковы:
  - курса – 5-7°;
  - скорости – 1,0-1,5 м/с;
  - дистанции – 2-3 км.
4. При обнаружении объекта на больших дистанциях, когда скорость изменения пеленга не превышает 0,1 град/мин, КПД определяются по альтернативному алгоритму, который не предполагает использования динамики изменения пеленга. В этом случае среднеквадратические погрешности определения КПД лежат в следующих пределах:
  - курса – 5-30°;
  - дистанции – до 20%;
  - среднеквадратическая погрешность скорости равна среднеквадратическому разбросу скорости объектов соответствующего класса.

### Заключение

1. Предложен не требующий специального маневрирования наблюдателя автоматический алгоритм определения КПД морского объекта, обнаруженного в режиме шумопеленгования гидроакустического комплекса ПЛ. В основе алгоритма – идея привлечь к решению задачи, помимо традиционно используемого массива пеленгов, полученные разными методами оценки скорости, курса и дистанции до объекта. При этом следует учитывать, что точность этих оценок существенно зависит от класса обнаруженного объекта, идентификация которого может занять продолжительное время. В связи с этим предлагается вычислять КПД для всех классов объектов, которые могут быть обнаружены в районе плавания, а затем из полученных результатов выбрать те, которые соответствуют фактически выявленному классу объекта.

2. Задействованные дополнительно при решении задачи определения КПД оценки скорости, курса и дистанции до объекта позволяют достичь результата и в том случае, когда пеленг обнаруженного объекта практически не изменяется.
3. Благодаря проведенному моделированию были оценены среднеквадратические погрешности определения КПД. Показано, что при обнаружении объекта на расстоянии до 30 км, т.е. когда скорость изменения пеленга составляет 0,5-1,0 град/мин и более, установившиеся значения среднеквадратических погрешностей определения КПД в среднем таковы:
  - курса – 5-7°;
  - скорости – 1,0-1,5 м/с;
  - дистанции – 2-3 км.
4. При обнаружении объекта на больших дистанциях, когда скорость изменения пеленга не превышает 0,1 град/мин и задача решается с помощью алгоритма, не связанного с динамикой изменения пеленга, среднеквадратические погрешности определения КПД лежат в пределах:
  - курса – 5-30°;
  - дистанции – до 20%;
  - среднеквадратическая погрешность скорости равна среднеквадратическому разбросу скорости объектов соответствующего класса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Справочник вахтенного офицера.** М.: Воениздат, 1975. 455 с.
2. **Поленин В.И.** Методы и задачи определения координат и параметров движения цели по данным ГАК подводных лодок: монография. СПб.: ВМА им. Н.Г. Кузнецова, 2004. 86 с.
3. **Benlian Xu B., Wang Z.,** An adaptive tracking algorithm for bearings-only maneuvering target, *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2007, vol. 7, no. 1, pp. 304–312.
4. **Landelle, B.,** Robustness considerations for bearings-only tracking, *11th International Conference on Information Fusion*, France: Thales Optronique, Universite Paris-Sud., 2008, p. 8.
5. **Kirubarajan, T., Bar-Shalom, Y., Lerro, D.,** Bearings-only tracking of maneuvering targets using a batch-recursive estimator, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, vol. 37, no. 3, pp. 770–780.
6. **Прокаев А.Н.** Метод относительных перемещений // *Гидроакустика*. 2021. Вып. 46 (2). С. 61–71.
7. **Гриненков А.В., Машошин А.И., Савватеев К.Ф.** Алгоритм автоматического определения координат и параметров движения целей без специального маневрирования наблюдателя // *Морская радиоэлектроника*. 2014. №4 (50). С. 50–57.
8. **Гриненков А.В., Машошин А.И.** Алгоритм определения координат и параметров движения объекта в интегрированной системе боевого управления подводной лодки // *Сборник докладов научно-технической конференции «Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов»*. М.: ОАО «Концерн «Моринсис-Агат», 2014. С. 212–221.
9. **Патент РФ № 2 649 887** с приоритетом от 10.05.2017 г. по заявке №2017116305. Способ определения координат (пеленга и дистанции) и параметров движения (курса и скорости) морской шумящей цели. Авторы: Гриненков А.В., Машошин А.И. Оpubл. 05.04.2018, бюлл. № 10.
10. **Репин В.Г., Тартаковский Г.П.** Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Сов. радио, 1977.
11. **Машошин А.И.** Синтез оптимального алгоритма пассивного определения дистанции до объекта // *Морская радиоэлектроника*. 2012. № 2 (40). С. 30–34.
12. **Машошин А.И.** Особенности синтеза алгоритмов классификации морских объектов по их гидроакустическому полю // *Морская радиоэлектроника*. 2009. №2 (28). С. 8–12.
13. **Бреннан Д.** Точность измерения угловых координат радиолокатором с антенной в виде фазированной решетки // *Зарубежная радиоэлектроника*. 1962. №1. С. 27–34.
14. **Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.** Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988.

15. Кудрявцев А.А., Лугинец К.П., Машошин А.И. Об амплитудной модуляции подводного шумоизлучения гражданских судов // Акустический журнал. 2003. Т. 49. № 2. С. 224–228.
16. Абчук В.А., Суздаль В.Г. Поиск объектов. М.: Сов. радио, 1977. 336 с.
17. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978.
18. Кендал М., Стюарт А. Статистические выводы и связи. М.: Наука, 1973.
19. Охрименко С.Н., Мнакацян А.А., Рубанов И.Л. Некоторые особенности шумоизлучения объектов, обнаруживаемых при помощи гидроакустических средств // Научный вестник ОПК России. 2023. Вып. 2. С. 51–56.
20. Марасев С.В., Машошин А.И. Задачи, решаемые системой гидроакустических расчетов // Морская радиоэлектроника. 2015. №2 (52). С. 40–45.
21. Микушин И.И. Метрологическое обеспечение измерений скорости звука в воде. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. 203 с.
22. Поляк Г.Л. Определение факта маневра цели // Морской сборник. 1989. №4.
23. Грибанов Ю.И., Мальков В.Л. Выборочные оценки спектральных характеристик стационарных случайных процессов. М.: Энергия, 1978.

### Приложение 1

#### Вывод формулы для вычисления относительного курса объекта по пеленгам

Относительный курс объекта, движущегося прямолинейно и равномерно, может быть определен по трем пеленгам (либо большему их числу), измеренным через некоторые произвольные (необязательно одинаковые) интервалы времени.

Выведем формулу для трех пеленгов.

Из треугольников  $HO_0O_1$  и  $HO_0O_2$  по теореме синусов получим:

$$\frac{\sin(P_1 - P_0)}{V\rho \cdot (t_1 - t_0)} = \frac{\sin(K\rho - P_0)}{R_1}, \quad (П1.1)$$

$$\frac{\sin(P_2 - P_0)}{V\rho \cdot (t_2 - t_0)} = \frac{\sin(K\rho - P_2)}{R_1},$$

где  $P_i$  – пеленг объекта в момент  $t_i$ ;  
 $R_1$  – дистанция до объекта в момент  $t_1$ ;  
 $V\rho, K\rho$  – относительные скорость и курс объекта.

Делим первое уравнение на второе:

$$\frac{\sin(P_1 - P_0) \cdot (t_2 - t_0)}{\sin(P_2 - P_0) \cdot (t_1 - t_0)} = \frac{\sin(K\rho - P_0)}{\sin(K\rho - P_2)}. \quad (П1.2)$$

Раскрыв скобки в правой части уравнения и выполнив несложные преобразования, запишем:

$$\begin{aligned} & \sin(P_1 - P_0) \cdot (t_2 - t_0) \cdot \cos(P_2) \cdot \operatorname{tg}(K\rho) - \sin(P_1 - P_0) \cdot (t_2 - t_0) \cdot \sin(P_2) = \\ & = \sin(P_2 - P_0) \cdot (t_1 - t_0) \cdot \cos(P_0) \cdot \operatorname{tg}(K\rho) - \sin(P_2 - P_0) \cdot (t_1 - t_0) \cdot \sin(P_0). \end{aligned} \quad (П1.3)$$

Отсюда следует:

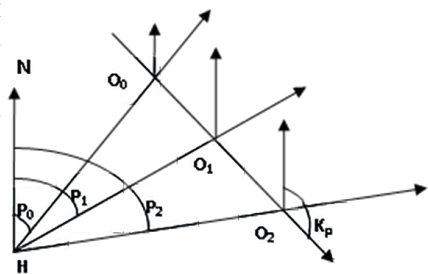


Рис. П1.1. Поясняющая иллюстрация к выводу формулы определения относительного курса объекта по трем пеленгам:  
 $H$  – местоположение наблюдателя,  
 $O_i$  – местоположение объекта в момент  $t_i$ ,  
 $N$  – направление на север,  $P_i$  – пеленг объекта в момент времени  $t_i$ ,  
 $K_p$  – относительный курс объекта

$$K\rho = \operatorname{arctg} \frac{\sin(P_1 - P_0) \cdot (t_2 - t_0) \cdot \sin(P_2) - \sin(P_2 - P_0) \cdot (t_1 - t_0) \cdot \sin(P_0)}{\sin(P_1 - P_0) \cdot (t_2 - t_0) \cdot \cos(P_2) - \sin(P_2 - P_0) \cdot (t_1 - t_0) \cdot \cos(P_0)}. \quad (\text{П1.4})$$

Чтобы повысить точность оценки относительного курса объекта, пеленги  $P_0$  и  $P_2$  необходимо максимально разнести по времени, а  $P_1$  должен быть примерно равным среднему арифметическому из  $P_0$  и  $P_2$ . Кроме того, для повышения точности за счет использования большего количества измеренных пеленгов следует составить систему уравнений (П1.4) для разных моментов времени и решать ее методом наименьших квадратов.

## Приложение 2

### Вывод формулы для вычисления среднеквадратической погрешности измерения уровня сигнала

Оценка мощности сигнала вычисляется по формуле

$$\hat{W}_s = \hat{W}_{s+n} - \hat{W}_n, \quad (\text{П2.1})$$

где  $\hat{W}_s, \hat{W}_{s+n}, \hat{W}_n$  – оценки мощности сигнала, смеси сигнала и помехи и помехи соответственно в полосе частот  $\Delta f$ .

Согласно [23], дисперсия оценки  $\hat{W}$  мощности сигнала в полосе частот  $\Delta f$  равна:

$$\sigma_{\hat{W}}^2 = \frac{W^2}{\Delta f \cdot T}, \quad (\text{П2.2})$$

где  $T$  – время накопления сигнала при измерении.

Отсюда с учетом (П2.1) следует:

$$\sigma_{\hat{W}_s}^2 = \sigma_{\hat{W}_{s+n}}^2 + \sigma_{\hat{W}_n}^2 = \frac{W_{s+n}^2}{\Delta f \cdot T} + \frac{W_n^2}{\Delta f \cdot T} = \frac{(W_s + W_n)^2 + W_n^2}{\Delta f \cdot T}. \quad (\text{П2.3})$$

Относительная дисперсия мощности сигнала примет вид:

$$\sigma_{\hat{W}_s/om}^2 = \frac{(W_s + W_n)^2 + W_n^2}{W_s^2 \cdot \Delta f \cdot T} = \frac{(q+1)^2 + 1}{q^2 \cdot \Delta f \cdot T}, \quad (\text{П2.4})$$

где  $q = \frac{W_s}{W_n}$  – отношение «сигнал–помеха» (по мощности) на выходе линейной части приемного тракта.

Относительную среднеквадратическую погрешность оценки уровня сигнала запишем как

$$\sigma_{\hat{W}_s/om} = \frac{\sqrt{(q+1)^2 + 1}}{q \cdot \sqrt{\Delta f \cdot T}}. \quad (\text{П2.5})$$

Относительную среднеквадратическую погрешность оценки уровня сигнала в децибелах представим следующим образом:

$$\sigma_{\hat{W}_s/om} = 10 \cdot \lg \left( 1 + \frac{\sqrt{(q+1)^2 + 1}}{q \cdot \sqrt{\Delta f \cdot T}} \right). \quad (\text{П2.6})$$

**Grinenkov, A.V., Mashoshin, A.I.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg)

Algorithm for Determining the Coordinates and Motion Parameters of an Underwater Noise Source without Special Maneuvering of Observer Vessel, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2024, vol. 32, no. 2 (125), pp. 98–122.

**Abstract.** The paper demonstrates an automatic algorithm for determining the coordinates and motion parameters of an underwater noise source detected by a submarine passive sonar. This algorithm does not require any special maneuvering of the observer vessel. The description of the algorithm and the results of its simulation for standard situations are presented.

**Key words:** underwater acoustics, noisy object, measurements of object's coordinates and motion parameters, simulation.

Материал поступил 09.01.2024